

УДК 622.691.4

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕРОЗІЙНОГО ЗНОШУВАННЯ ФАСОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ ТРУБОПРОВОДІВ

Я. В. Дорошенко, В. Б. Запхляк, Т. І. Марко, Р. Б. Стасюк

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 727138,

e-mail: sr gg @ n i n g . e d u . u a

Розроблено і побудовано багатофункціональний експериментальний стенд-макет лінійної частини газопроводу для комплексних досліджень руху двофазних потоків прозорими фасонними елементами трубопроводів, руху внутрішньотрубних засобів трубопроводами, ефективності очищення трубопроводів різними способами. Наведена принципова схема експериментального стенду, описана методика експериментальних досліджень ерозійного зношування фасонних елементів (відводів, трійників) трубопроводів.

Місця інтенсивного ерозійного зношування відводів, трійників виявлялись експериментальним шляхом та комп'ютерним моделюванням багатофазних потоків в програмному комплексі ANSYS Fluent R17.0 Academic.

Для трійників дослідження виконувались для різних схем руху потоку (потік рухається магістраллю трійника і з магістралі частина потоку перетікає у відвід трійника; потік рухається магістраллю трійника і з магістралі направляється у відвід трійника; потік рухається відводом трійника і з нього спрямовується у одну з сторін магістралі трійника).

Для експериментального виявлення місць ерозійного зношування фасонних елементів трубопроводів їх внутрішня поверхня фарбувалась трьома шарами червоної фарби. Місце інтенсивного ерозійного зношування прозорих фасонних елементів трубопроводів визначалось шляхом виявлення місць їх внутрішньої поверхні з видаленою двофазним потоком фарбою.

Результати комп'ютерного моделювання були візуалізовані в постпроцесорі програмного комплексу побудовою полів швидкості ерозійного зношування на контурах фасонних елементів.

Отримані результати є корисними для фахівців, які займаються обстеженням магістральних газопроводів.

Ключові слова: відвід, двофазний потік, експериментальний стенд, кварцовий пісок, трійник.

Разработан и построен многофункциональный экспериментальный стенд-макет линейной части газопровода для комплексных исследований движения двухфазных потоков прозрачными фасонными элементами трубопроводов, движения внутритрубных средств трубопроводами, эффективности очистки трубопроводов различными способами. Приведена принципиальная схема экспериментального стенда, описана методика экспериментальных исследований эрозионного износа фасонных элементов (отводов, тройников) трубопроводов.

Места интенсивного эрозионного износа отводов, тройников определялись экспериментальным путем и компьютерным моделированием многофазных потоков в программном комплексе ANSYS Fluent R17.0 Academic.

Для тройников исследования выполнялись для различных схем движения потока (поток движется магистралью тройника и с магистрали часть потока перетекает в отвод тройника; поток движется магистралью тройника и с магистрали направляется в отвод тройника; поток движется отводом тройника и из него направляется в одну из сторон магистрали тройника).

Для экспериментального обнаружения мест эрозионного износа фасонных элементов трубопроводов их внутренняя поверхность красилась тремя слоями красной краски. Место интенсивного эрозионного износа прозрачных фасонных элементов трубопроводов определялось путем выявлением мест их внутренней поверхности с удаленной двухфазным потоком краской.

Результаты компьютерного моделирования были визуализированы в постпроцессоре программного комплекса построением полей скорости эрозионного износа на контурах фасонных элементов.

Полученные результаты полезны для специалистов, занимающихся обследованием магистральных газопроводов.

Ключевые слова: отвод, двухфазный поток, экспериментальный стенд, кварцевый песок, тройник.

Multifunctional experimental model of a gas pipeline linear section for researching the two-phase flow by pipeline fittings, in-tube flow, and the cleaning efficiency of pipelines by means of different methods has been developed and constructed. A design of experimental model has been proposed and the methodology for the experimental research of erosive wear of the pipeline fittings (bends, t-sockets) has been described.

Places of intensive erosive wear of bends and t-sockets have been defined by experimentation and computer modeling of multi-phase flows in software ANSYS Fluent R17.0 Academic.

The research for t-sockets has been performed for different schemes of flow (it is flown at the main pipe of a t-socket, and then a part of flow runs into the bend of a t-socket; it is flown at the main pipe of a t-socket and from there into the t-socket's bend; it is flown at the t-socket's bend and then into one of the main pipes of a t-socket).

To reveal the places of erosive wear of pipeline fittings, their inner surface has been painted red in three layers. The place of intensive erosive wear has been defined through discovering the places where paint was removed by two-phase flow.

The computer modeling results have been visualized in postprocessor software system by constructing the fields of erosive wear rate on fittings lines.

The obtained results are useful for specialists engaged in researching the main gas pipelines.

Keywords: bend, two-phase flow, experimental model, quartz sand, T-socket.

Вступ. Транспортований магістральними газопроводами природний газ містить рідкі та тверді частинки (забруднення). До рідких відносяться газовий конденсат, вода, мастило та інші вуглеводні. До твердих – винесена з свердловин родовищ порода, пісок, окалина, яка відшарувалась від внутрішньої стінки труб, продукти внутрішньотрубної корозії. Причини наявності таких забруднень у внутрішній порожнині газопроводів різні. Перш за все це неякісне очищення газу на промислі, конденсавання рідини з газового потоку за сприятливих термодинамічних умов під час перекачування газу газопроводом, винесення мастила з підшипників нагнітачів газоперекачувальних агрегатів, неякісне очищення внутрішньої порожнини газопроводу перед здаванням у експлуатацію тощо. Аварійні відмови, неякісна робота устаткування сепарації установок комплексної підготовки газу газодобувних підприємств України, зумовлена виснаженням родовищ (зменшується тиск, витрата), зношення внутрішніх відбійників сепараторів, призводять до подавання в магістральні газопроводи великого обсягу пластової води, конденсату, частинок породи, винесеної газовим потоком з свердловини. Хімічна реакція між металом труби і рідкими забрудненнями накопиченими у понижених місцях газопроводів, призводять до внутрішньотрубної корозії і утворення твердих частинок.

Наявність у внутрішній порожнині газопроводів рідких і твердих частинок призводить до виникнення багатофазних потоків, які відрізняються набагато складнішою фізикою, ніж однофазні. Під час руху багатофазних потоків фасонними елементами (відводами, трійниками) лінійної частини газопроводів рідкі та тверді частинки ударяються до стінки трубопроводу, що призводить до його ерозійного зношування. Ерозія фасонних елементів лінійної частини газопроводів може призвести до розриву труби і втрат продукту, становить загрозу для життя і може бути причиною руйнувань будівель, оскільки велика кількість таких елементів розміщена в середині будівель та в межах території компресорних станцій, підземних сховищ газу, надземних переходів, які містять компенсатори. Для своєчасного та якісного обстеження фасонних елементів треба знати місця їх максимального ерозійного зношування.

Процес ерозійного зношування є надзвичайно складним явищем. Для якісного обстеження фасонних елементів трубопроводів важливо знати місця їх ерозійного зношування, оскільки зміщення ультразвукового первинного перетворювача тільки на кілька сантиметрів від місця ерозійного зношування може призвести до суттєвого зниження якості обстеження фасонних елементів. Щоб повно і всебічно дослідити ерозійне зношування фасонних елементів лінійної частини газопроводів треба мати інфо-

рмацію про фізичну картину руху ними багатофазних потоків. Треба знати місця інтенсивного ударяння рідких і твердих частинок, які переносяться потоком природного газу, до стінки трубопроводу, швидкість, діаметри частинок, кути атаки в місці ударяння. В реальних умовах магістральних газопроводів таку інформацію отримати неможливо, оскільки:

- труби магістральних газопроводів сталеві, що унеможливорює візуальне спостереження за потоком;

- неможливо визначити точне значення швидкості рідких і твердих частинок в будь-якій точці тривимірного потоку газу в фасонному елементі;

- магістральні газопроводи перебувають під високим тиском;

- неможливо візуалізувати потік газу в магістральному газопроводі.

На сьогодні таку інформацію можна отримати моделюванням тривимірних потоків у сучасних програмних комплексах CFD (Computational Fluid Dynamics) моделювання. Підтвердити достовірність такого моделювання можна експериментальними дослідженнями в лабораторних умовах шляхом дослідження руху двофазного потоку прозорими трубами та прозорими фасонними елементами.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень і публікацій. Багатофазні турбулентні потоки спостерігаються в трубопроводах різного призначення (газопроводах, нафтопроводах, нафтопродуктопроводах, азотпроводах, паропроводах атомних і теплових електричних станцій, пневмотранспорті тощо). Це зумовлює цікавість багатьох дослідників до їх вивчення. Теоретично та експериментально рух таких потоків трубопроводами досліджували багато науковців.

Комп'ютерним моделюванням багатофазних тривимірних потоків у фасонних елементах трубопроводів різноманітними програмними комплексами займаються багато сучасних науковців. Їхні результати підтверджують, що такі програмні комплекси є ефективним засобом для отримання фізичної картини руху багатофазного потоку у вказаних елементах, визначення місць інтенсивного ударяння частинок до стінки трубопроводу, швидкості частинок. Abdolkarimi V. і Mohammadikhah R. [1], Kuan B. [2], K. Mohanarangam, Z. Tian, і J. Tu [3], [4], Ibrahim K., El-Kadi M., Named M. і El-Beheri S. [5], Tian Z. [6] комп'ютерним моделюванням досліджували рух твердих частинок відводами трубопроводів діаметром до 300 мм з кутом повороту на кут 90°. Визначали траєкторії руху частинок різних діаметрів, швидкості їх руху. Azimian M. і Bart H.-J. комп'ютерним моделюванням досліджували рух твердих частинок відводом та трійником пульпопроводу діаметра-

ми 40 мм [7]. Q. Mazumder досліджував ерозійне зношування S-зігнутої труби внутрішнім діаметром 12,7 мм. Було виявлено місця ерозійного зношування S-зігнутої труби комп'ютерним моделювання і експериментально виявлено місця ударяння частинок піску розміром 150 і 300 мкм до стінок прозорої пластикової S-зігнутої труби [8]. Дорошенко Я.В., Марко Т. І., Дорошенко Ю.І. комп'ютерним моделюванням досліджували рух багатозначних потоків фасонними елементами обв'язки компресорної станції. Побудувавши траєкторії руху крапель конденсату і твердих частинок фасонними елементами виявлено місця їх інтенсивного ударяння до стінки трубопроводу, визначено швидкість, кути атаки, діаметри в місці ударяння [9, 10].

Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблеми, якій присвячується дана стаття. Якщо однофазні газові (повітряні) потоки у фасонних елементах трубопроводів вивчені достатньо добре, то багатозначні потоки у відводах, трійниках вивчені не достатньо. Фізична картина багатозначного потоку в фасонних елементах магістральних газопроводів є складною, неоднозначною і її досить важко розрахувати теоретично, а в реальних умовах магістральних газопроводів експерименти виконати неможливо. Результати експериментальних досліджень, де б чітко було видно або описано траєкторії руху частинок фасонними елементами трубопроводів, місця їх інтенсивного ударяння до стінки, діаметри частинок, кути атаки в місці ударяння, місця ерозійного зношування фасонних елементів знайти важко.

Формулювання цілей статті. Завданням є розроблення експериментального стенду для дослідження руху двофазних потоків фасонними елементами трубопроводів. Виявлення місць інтенсивного ерозійного зношування фасонних елементів трубопроводів.

Виклад основного матеріалу

Сучасні програмні комплекси CFD моделювання тривимірних потоків дають можливість досліджувати рух однофазних, багатозначних потоків трубопроводами, фасонними елементами трубопроводів.

Комп'ютерне моделювання фізичної картини руху газового потоку фасонними елементами газопроводів складної геометрії складається з трьох етапів:

- моделювання турбулентного руху газу фасонними елементами газопроводів [11];
- моделювання руху дискретних фаз в потоці газу фасонними елементами газопроводів [9, 10];
- моделювання ерозійного зношування стінок фасонних елементів газопроводів [10].

Результати моделювання в таких комплексах візуалізуються побудовою ліній течії, полів модуля швидкостей та тиску на контурах в поперечних і поперечних перерізах, заливки модуля швидкостей та тиску в внутрішній порож-

нині фасонних елементів [11], побудовою траєкторій руху дискретних фаз в потоці природного газу, які забарвлюються в кольори, що відповідають швидкості та діаметру крапель і твердих частинок відповідно до шкали значень [9], [10], побудовою полів концентрації дискретної фази та полів швидкості ерозійного зношування на контурах фасонних елементів трубопроводів складної геометрії [10].

Однак для більш повного розуміння фізичної картини руху однофазних, двофазних потоків фасонними елементами трубопроводів складної геометрії потрібний комплексний підхід – комп'ютерне моделювання і його апробування експериментальними дослідженнями в лабораторних умовах.

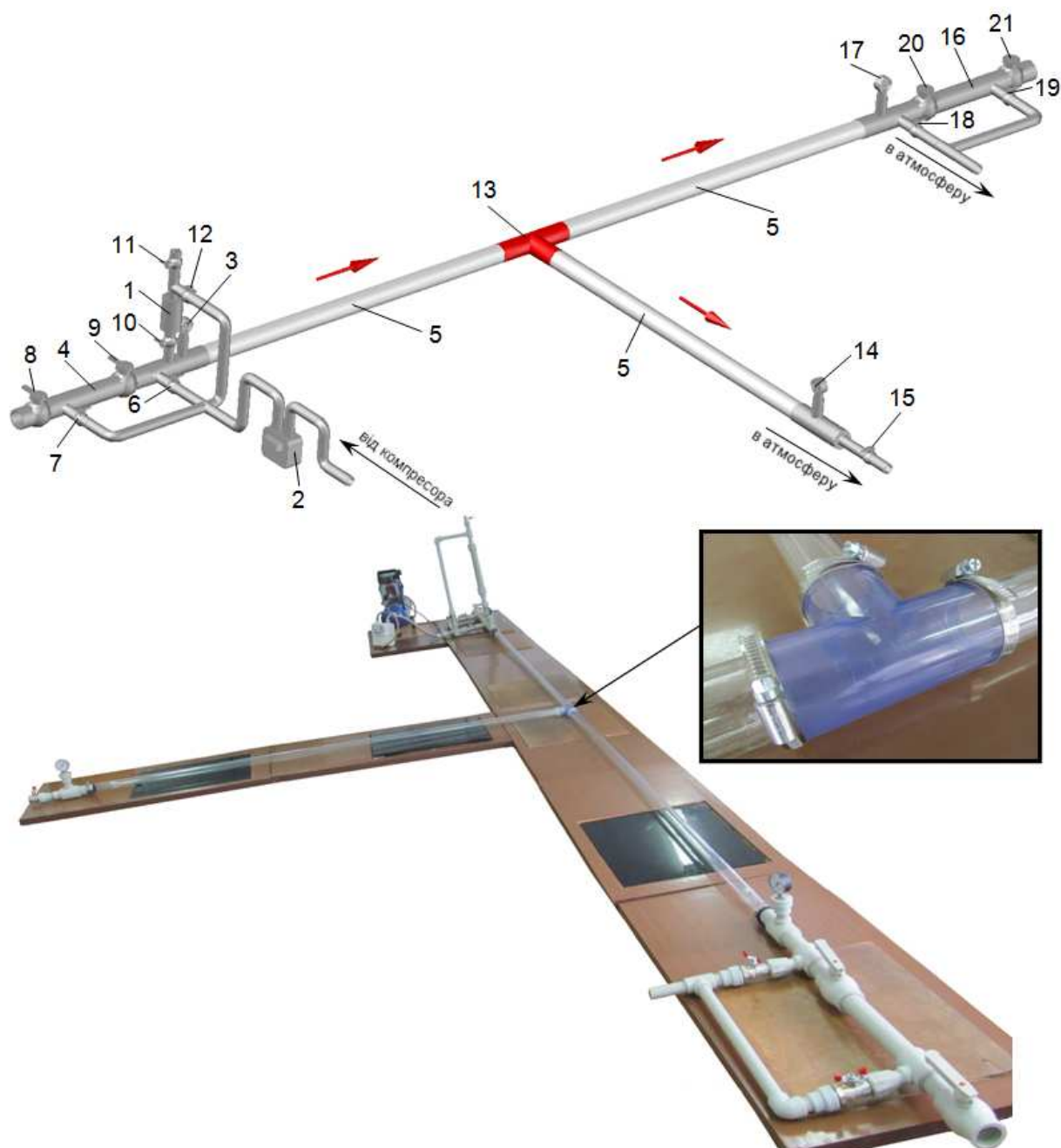
Експериментальні дослідження виконано в лабораторії кафедри спорудження та ремонту газонафтопроводів і газонафтоховищ ІФНТУНГ. Для досліджень розроблено і побудовано багатофункціональний експериментальний стенд-макет лінійної частини газопроводу, який дає змогу виконувати комплексні дослідження руху потоків фасонними елементами трубопроводів, руху внутрішньотрубних засобів трубопроводами, ефективності очищення трубопроводів різними способами.

Експериментальний стенд призначений для розв'язування таких задач:

- дослідження руху однофазних потоків фасонними елементами трубопроводів;
- дослідження руху двофазних потоків фасонними елементами трубопроводів;
- виявлення місць ерозійного зношування фасонних елементів трубопроводів;
- дослідження руху внутрішньотрубних засобів трубопроводами;
- апробація інноваційного методу реконструкції теплогазових мереж протягуванням нового поліетиленового трубопроводу в дефектний сталевий поршнем;
- дослідження ефективності очищення трубопроводів очисними поршнями;
- дослідження ефективності очищення трубопроводів швидкісними потоками.

Експериментальний стенд складається з скляних труб внутрішнім діаметром 38 мм, товщиною стінки 3,5 мм і довжиною 2,4 м, прозорих фасонних елементів для візуалізації потоку, вузлів запускання-приймання внутрішньотрубних засобів, запускання-випускання дискретних фаз. Скляні труби, вузли запускання-приймання внутрішньотрубних засобів, фасонні елементи з'єднуються одне з одним, що дає змогу змінювати конфігурацію стенду, схеми руху потоків трійниками.

Експериментальний стенд для дослідження руху двофазних потоків трійником наведений на рис. 1. Експериментальний стенд складається з вузла запускання внутрішньотрубних засобів та дискретних фаз в трубопровід, вузла приймання внутрішньотрубних засобів та випускання двофазного потоку з трубопроводу, вузла випускання двофазного потоку з трубопроводу, прозорого пластикового трійника 13, прозорих скляних труб 5.



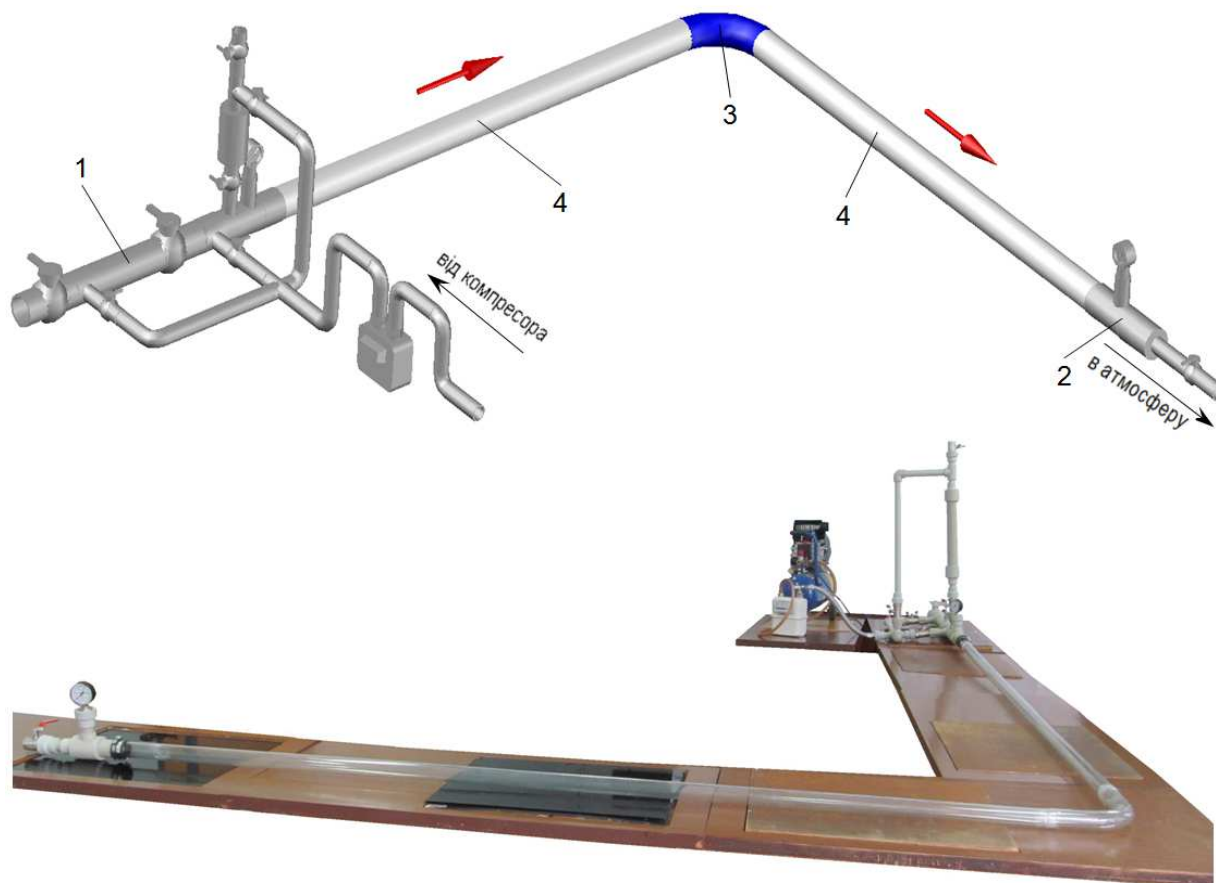
1 – ємність для дискретних фаз; 2 – газовий лічильник; 3, 14, 17 – манометр;
4 – камера запускання; 5 – скляна труба; 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 15, 18, 19, 20, 21 – кран;
13 – трійник; 16 – камера приймання

Рисунок 1 – Експериментальний стенд для досліджень руху двофазних потоків трійником

Вузол запускання внутрішньотрубних засобів та дискретних фаз в трубопровід (рис. 1) виготовлений з пластикових труб і фасонних елементів і складається з ємності для твердої та рідкої фази 1, газового лічильника 2, манометра 3, камери запускання внутрішньотрубних засобів 4, кранів 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11. В трубопровід повітря подається від компресора через газовий лічильник 2 після відкриття крана 6. Щоб запустити внутрішньотрубний засіб в трубопровід його поміщають в камеру 4 через відкритий кран 8, тоді закривають крани 6 та 8 і відкривають крани 7 та 9. Щоб подати тверду або

рідку фазу в трубопровід її засипають або заливають в ємність 1 через відкритий кран 11, тоді закривають кран 11 і відкривають крани 12 та 10. Дискретну фазу подають в трубопровід тільки після досягнення необхідної витрати повітряного потоку. Тиск на дискретну фазу в ємності 1 необхідний для того, щоб забезпечити безперервний потік твердих або рідких частинок з регульованою краном 12 витратою та для уникнення зворотного потоку.

Вузол приймання внутрішньотрубних засобів та випускання двофазного потоку з трубопроводу (рис. 1) виготовлений з пластикових



1 – вузол запускання внутрішньотрубних засобів та дискретних фаз в трубопровід;
2 – вузол випускання двофазного потоку з трубопроводу; 3 – скляний відвід; 4 – скляна труба
Рисунок 2 – Експериментальний стенд для досліджень руху двофазних потоків відводом

труб та фасонних елементів і складається з камери приймання 16, манометра 17, кранів 18, 19, 20, 21. Двофазний потік з трубопроводу в атмосферу випускають через кран 18. Щоб прийняти внутрішньотрубний засіб з трубопроводу відкривають крани 20 і 19 і закривають кран 18. Коли внутрішньотрубний засіб буде знаходитись в камері приймання 16 відкривають крани 18 і закривають крани 19 і 20. Тоді, відкривши кран 21, виймають внутрішньотрубний засіб з трубопроводу.

Вузол випускання двофазного потоку з трубопроводу (рис. 1) також виготовлений з пластикових труб, фасонних елементів і складається з манометра 14 та крана 15.

Експериментальні дослідження руху двофазних потоків трийником виконувались для різних схем руху потоку:

- потік рухається магістраллю трийника і з магістралі частина потоку перетікає у відвід трийника (рис. 1);
- потік рухається магістраллю трийника і з магістралі увесь потік направляється у відвід трийника;
- потік рухається відводом трийника і з відводу направляється у магістраль трийника, де частина потоку перетікає в одну сторону магістралі, а друга частина в іншу сторону магістралі;
- потік рухається відводом трийника і з відводу направляється у одну з сторін магістралі.

Зміна схем руху потоку виконувалась змінною конфігурації стенду, що було можливо завдяки тому, що скляні труби, прозорий пластиковий трийник, вузли запускання-приймання внутрішньотрубних засобів та дискретних фаз з'єднані одне з одним бандажами з резиновими прокладками, які легко знімаються.

Експериментальний стенд для дослідження руху двофазних потоків відводом наведений на рис. 2. Експериментальний стенд складається з вузла запускання внутрішньотрубних засобів та дискретних фаз в трубопровід 1, вузла випускання двофазного потоку з трубопроводу 2, прозорого скляного відводу 3 з поворотом на кут 90° , прозорих скляних труб 4 внутрішнім діаметром 38 мм, товщиною стінки 3,5 мм і довжиною 2,4 м.

Одним з призначень експериментального стенду є дослідження руху двофазних потоків фасонними елементами трубопроводів, виявлення місць ерозійного зношування фасонних елементів трубопроводів. Для цього потрібно спостерігати за траєкторіями руху дискретних фаз прозорими фасонними елементами, виявлення місця їх інтенсивного ударяння до стінки трубопроводу, визначати кути атаки, діаметри частинок в місці ударяння, виявляти місця інтенсивного ерозійного зношування фасонних елементів.

Стиснуте повітря подається від поршневого компресора з ресивером. Витрата повітря вимірюється лічильником GF-1 OKTAVA максимальна об'ємна витрата якого 6,0 м³/год, мінімальна 0,04 м³/год. Межі допустимої відносної похибки лічильника $\pm 2,0 \%$. Тиск вимірюється манометром надлишкового тиску класу точності 2,5. Діапазон вимірювань тиску від 0 до 0,1 МПа.

Експериментальні дослідження виконувались таким чином. Відкривши кран 6 вузла запускання внутрішньотрубних засобів та дискретних фаз (рис. 1) повітря подавалось від компресора в трубопровід. Витрата повітря на вході, яка визначає середню швидкість двофазного потоку, вимірювалась газовим лічильником 2, а тиск манометром 3 (рис. 1). Середня швидкість повітря в трубопроводі розраховувалась. Відкривши кран 11, засипалась (заливалась) дискретна фаза в ємність для твердої та рідкої фази 1. Після досягнення необхідної витрати повітряного потоку трубопроводом кран 11 закривався, а відкривши крани 10 і 12 дискретна фаза запускалась в трубопровід (рис. 1). Витрата дискретної фази визначалась шляхом фіксування часу, за який випорожниться ємність для твердої та рідкої фази 1 (рис. 1). Швидкість дискретної фази визначалась фіксування часу, за який частинка подолає віддаль між приклеєними до скляної труби білими смужками.

Також під час експериментальних досліджень вимірювався тиск в місці випускання двофазного потоку з трубопроводу манометром 17 вузла приймання внутрішньотрубних засобів та випускання двофазного потоку з трубопроводу та манометром 14 вузла випускання двофазного потоку з трубопроводу (рис. 1).

У якості твердих частинок використовувался кварцовий пісок. В трубопровід подавався кварцовий пісок з різними розмірами зерен.

Експериментальні дослідження виконувались при заданій витраті повітря 0,015 м³/с, масовій витраті дискретної фази 34 г/с, середньому тиску в трубопроводі 4540 Па, температурі довкілля 20 °С.

Для виявлення місць ерозійного зношування фасонних елементів трубопроводів внутрішня поверхня відводу, трійника фарбувалась червоною фарбою. Щоб фарбу нанести рівномірно шаром однакової товщини один з кінців фасонного елемента заглушувався, а в інший наливалась фарба.

Місце інтенсивного ерозійного зношування фасонних елементів трубопроводів визначалось шляхом виявлення місць внутрішньої поверхні фасонного елемента з видаленою двофазним потоком фарбою.

Щоб підвищити точність кожен експеримент повторювався три рази. Після кожного експерименту вимірювались місце або місця з видаленою фарбою, здійснювалось їх фотографування. Тоді фасонний елемент видалявся з експериментального стенду, очищувався від фарби та заново фарбувався і після висихання фарби експеримент повторювався.

Також місця інтенсивного ерозійного зношування фасонних елементів трубопроводів виявлялись комп'ютерним моделюванням в програмному комплексі ANSYS Fluent R17.0 Academic.

Для моделювання ерозійного зношування в ANSYS Fluent закладено підхід Лагранжа (модель DPM (Discrete Phase Model – модель дискретної фази)). В основі підходу Лагранжа лежить розгляд руху окремих частинок (або груп частинок) дискретної фази. Лагранжева модель DPM дає змогу дослідити траєкторії руху частинок дискретної фази в суцільній фазі розв'язанням диференційного рівняння руху частинок. Дискретна фаза може бути як твердою, так і бульбашками в рідині чи краплями в газі. Модель враховує двосторонній обмін масою, імпульсом і енергією частинок із суцільною фазою. Модель DPM застосовується для невеликих значень об'ємної концентрації частинок оскільки взаємодія часток між собою враховується опосередковано. Перевагою моделі DPM є можливість точно враховувати характер взаємодії дискретної фази зі стінкою. В рамках моделі взаємодії дискретної фази зі стінкою є додаткова модель ерозії стінки. Крім того, в рамках моделі DPM набагато простіше враховувати вторинний розпад дискретної фази (якщо це краплі або бульбашки). Недоліком моделі DPM є обмеження на локальну об'ємну концентрацію частинок (менше 10 %).

Комплексна процедура чисельного моделювання складається з трьох етапів:

- моделювання газового потоку (суцільної фази) в фасонних елементах газопроводів;
- моделювання руху рідких і твердих частинок в газовому потоці фасонними елементами газопроводів;
- розрахунок ерозійного зношування фасонних елементів газопроводів.

Рух суцільної фази в ANSYS Fluent моделюється шляхом чисельного розв'язування систем рівнянь, які описують найзагальніший випадок руху газоподібного середовища. Такими є рівняння Нав'є – Стокса (1), яке виражає собою закон збереження імпульсу, (або Рейнольдса (2), якщо потік турбулентний) і нерозривності (3), яке виражає собою закон збереження маси

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right) + f_i, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{u}_i' \bar{u}_j') = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right) + f_i, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = 0, \quad (3)$$

де x_i, x_j – координати;
 t – час;
 u_i, u_j – компоненти швидкості;
 ρ – густина газу;
 μ – молекулярна динамічна в'язкість газу;
 f_i – доданок, який враховує дію масових сил;
 p – тиск;
 \bar{u}_i – усереднені за часом значення швидкостей;
 \bar{u}'_i – складові пульсації швидкості. [12]

Граничними умовами, як правило, є розподіл усіх складових швидкості у вхідному перерізі і рівність нулю перших похідних (у напрямку потоку) складових швидкості у вихідному перерізі. Тиск у рівняннях тільки у вигляді перших похідних, тому потрібно вказати тиск тільки в будь-якій одній точці розрахункової геометрії.

В ANSYS Fluent ці рівняння замикаються двопараметричною $k-\varepsilon$ (k – турбулентна енергія, ε – швидкість дисипації турбулентної енергії) моделлю турбулентності, яка передбачає розв'язання таких рівнянь:

- рівняння перенесення турбулентної енергії k

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla(\rho u k) = \nabla \cdot \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right) + \mu_t G - \rho \varepsilon ; \quad (4)$$

- рівняння перенесення турбулентної дисипації ε

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla(\rho u \varepsilon) = \nabla \cdot \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right) + C_1 \frac{\varepsilon}{k} \mu_t G - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} , \quad (5)$$

де u – швидкість потоку газу;
 μ_t – турбулентна динамічна в'язкість газу;
 σ_k – коефіцієнт, який рівний одиниці;
 G – розрахунковий параметр;
 σ_ε – коефіцієнт, рівний $\sigma_\varepsilon = 1,3$;
 C_1 – коефіцієнт, рівний $C_1 = 1,44$;
 C_2 – коефіцієнт, рівний $C_2 = 1,92$.

Моделювання турбулентності $k-\varepsilon$ є так званою "високореїнольдсовою" моделлю, створеною на основі методу усереднення рівнянь Нав'є-Стокса і призначена для розрахунку турбулентних процесів.

Речовина, яка присутня в потоці суцільної фази у вигляді дискретної фази, не утворює суцільне середовище, а окремі частинки взаємодіють з потоком суцільної фази і між собою. Для моделювання руху дискретної фази в суцільній фазі в ANSYS Fluent застосовується підхід Лагранжа, тобто відстежується рух

окремо взятих частинок під дією сил з боку потоку суцільної фази.

Вважають, що частки дискретної фази є сферами. Сили, які діють на частинку, обумовлені різницею швидкості частинки і швидкості потоку суцільної фази, а також витісненням цією часткою середовища суцільної фази. Рівняння руху такої частки було виведено в роботі [13], і воно має вигляд

$$m_c \frac{du_c}{dt} = 3\pi\mu d_c C_{cor} (u - u_c) + \frac{\pi d_c^3 \rho}{6} \frac{du}{dt} + \frac{\pi d_c^3 \rho}{12} \left(\frac{du}{dt} - \frac{du_c}{dt} \right) + F_e - \frac{\pi d_c^3}{6} (\rho_c - \rho) \bar{\omega} \times (\bar{\omega} \times \bar{r}) - \frac{\pi d_c^3 \rho_c}{3} (\bar{\omega} \times u_c) , \quad (6)$$

де m_c – маса частинки,

u_c – швидкість руху частинки;

d_c – діаметр частинки;

C_{cor} – коефіцієнт в'язкого опору;

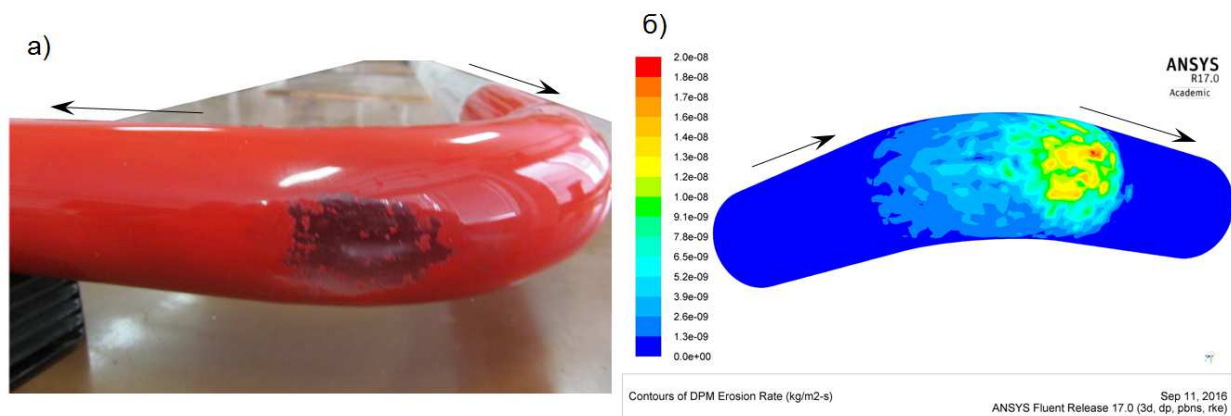
F_e – зовнішня сила, яка безпосередньо діє на частинку (наприклад, сила тяжіння або сила електричного поля);

$\bar{\omega}$ – кутова швидкість обертання;

\bar{r} – радіус вектор (у разі розгляду руху у відносній системі відліку).

Ліва частина рівняння (6) є сумою усіх сил, які діють на частинку, вираженою через масу і прискорення цієї частинки. Першим доданком в правій частині є гальмування частинки в результаті в'язкого тертя до потоку суцільної фази відповідно до закону Стокса. Другий доданок – сила, прикладена до частинки, яка зумовлена спричиненим прискоренням потоку суцільної фази перепадом тиску в суцільній фазі, оточуючій частинку. Третій доданок – сила, необхідна для прискорення ваги суцільної фази в об'ємі, витісненому частинкою. Ці два доданки треба враховувати, коли густина основної фази більша густини частинок. Четвертий доданок (F_e) – зовнішня сила, яка безпосередньо діє на частинку, наприклад, сила тяжіння або сила електричного поля. Останні два доданки – відцентрова сила і сила Коріоліса, які мають місце тільки у разі розгляду руху у відносній системі відліку. Крім того, іноді в правій частині (6) треба врахувати деякі додаткові сили (наприклад у разі наявності в потоці значного перепаду температур).

Рівняння (6) є диференціальне рівняння першого порядку, в якому єдиною невідомою величиною є швидкість частинки u_c , а аргументом – час t . Швидкість потоку суцільної фази u у всіх точках простору вважається відомою і визначається розв'язуванням рівнянь (1), (2), (3). Вихідними даними, крім розміру і властивостей частинки є її положення в початковий момент часу. Вказується також, що має відбуватися у разі ударяння частинки до стінки або до іншої частинки. Для виконання розрахунку доданки, які містять u_c , переносяться в ліву



а) – відвід з видаленою двофазним потоком фарбою з внутрішньої його поверхні;
б) – поля швидкості ерозійного зношування на контурах відводу

Рисунок 3 – Результати досліджень відводу на ерозійне зношування

частину рівняння (6). Швидкість і положення частинки в кожному наступний момент часу визначається шляхом чисельного інтегрування за часом з деяким кроком Δt усіх інших доданків рівняння (6).

Алгоритми, реалізовані в ANSYS Fluent, дають змогу моделювати вплив на потік суцільної фази дискретної фази. У першому наближенні густина і в'язкість речовини суцільної фази та деякі інші величини множаться на $(1 - \alpha_c)$, де α_c – питомий об'єм, зайнятий частинками. Тоді на кожному кроці за часом виконується розрахунок зміни маси, імпульсу і енергії частинок, і ці зміни додаються, відповідно в рівняння збереження маси (2), імпульсу (1) і енергії для потоку суцільної фази. Таким чином, розрахунок потоку суцільної фази і розрахунок руху частинок виконується спільно.

Якщо потік речовини суцільної фази є турбулентним, то траєкторія руху частинок не є детермінованою, оскільки залежить від інтенсивності і напрямку турбулентних пульсацій. В сучасних програмних продуктах реалізовано кілька граничних умов, які відповідають різним подіям, що відбуваються у разі ударяння частинки до стінки: відбивання в результаті пружного або непружного ударяння, прилипання до стінки, ковзання уздовж стінки (залежно від фізичних властивостей і кута атаки), проходження крізь стінку (якщо стінка пориста) тощо. Є також можливість моделювання розщеплення і зливання при певних умовах крапель води або бульбашок газу під час їх зіткнення одна з одною. [14]

В програмному комплексі Ansys Fluent розрахунок ерозійного зношування виконується з використанням моделі Фінні, розробленої для жорстких пластичних матеріалів шляхом аналізу рівнянь руху однієї частинки під час її зіткнення з поверхнею. Для оцінювання обсягу втрати матеріалу поверхні, зумовленої зіткненнями з нею частинки, була досліджена траєкторія руху частинки. При цьому було прийнято такі припущення:

- прорізання поверхні є пластичною деформацією;
- тріщини не поширюються попереду частинки, яка ріже поверхню;
- відшарування матеріалу спричинене різальною дією частинок.

Даний модель неможливо застосовувати для крихких матеріалів.

Згідно з моделлю Фінні, питома швидкість ерозії (маса поверхні вилучена з одиниці площі за одиницю часу) на поверхні рівна

$$E = K u_c^n f(\theta), \quad (7)$$

де K – коефіцієнт, який залежить від модуля пружності матеріалу стінки і густини частинки; n – стала, яка залежить від матеріалу стінки (для сталі змінюється від 2,3 до 2,5);

$f(\theta)$ – безрозмірна функція, яка враховує вплив кута атаки θ на швидкість ерозійного зношування. Ця функція може мати різний вигляд. Наприклад, в роботі [15] вона має вигляд:

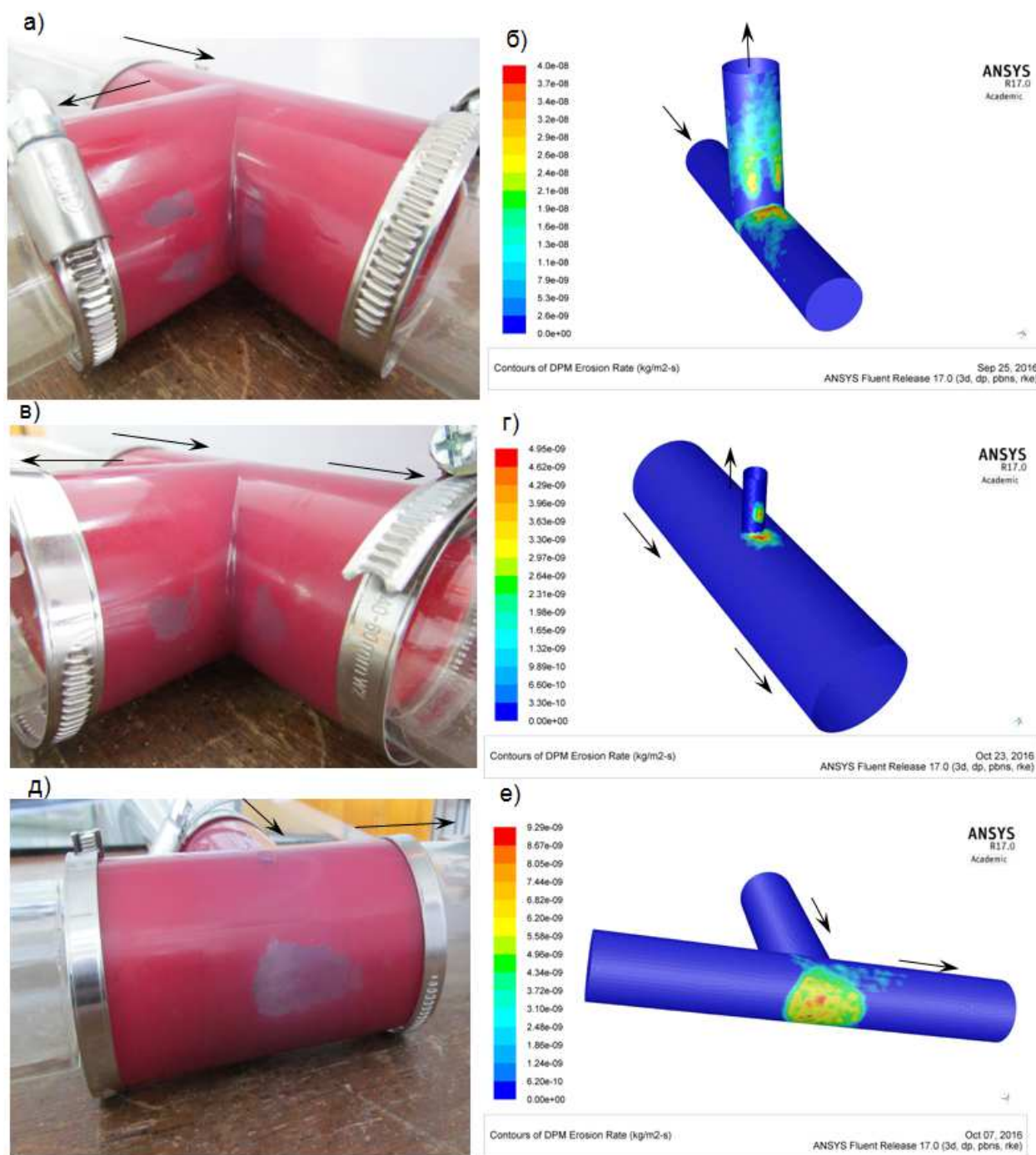
$$f(\theta) = \begin{cases} A\theta^2 + B\theta & \dots \theta \leq \varphi \\ X \cos^2 \theta \sin(W\theta) + Y \sin^2 \theta + Z & \dots \theta > \varphi, \end{cases} \quad (8)$$

де A , B , W , X , Y , Z , φ – емпіричні коефіцієнти.

Результати моделювання були візуалізовані в постпроцесорі програмного комплексу побудови полів швидкості ерозійного зношування на контурах фасонних елементів.

Місце інтенсивного ерозійного зношування відводу (рисунок 3, а, б) розміщене з опуклого його боку в кінці заокругленої частини відводу. Таке місцезнаходження інтенсивного ерозійного зношування відводу свідчить, що потік повітря впливає на рух частинок піску відводом і переважна їх більшість ударяється до стінки відводу не в середині заокругленої його частини з опуклого боку, а в кінці.

У трійнику, в якому потік рухається магістраллю трійника, і з магістралі частина потоку спрямовується у відвід трійника (рис. 4, а, б) місце інтенсивного ерозійного зношування розміщене і у магістралі і у відводі трійника. У



а), в), д) – трійник з видаленою двофазним потоком фарбою з внутрішньої його поверхні;
б), г), е) – поля швидкості ерозійного зношування на контурах трійника

Рисунок 4 – Результати досліджень трійника на ерозійне зношування трійника

магістралі трійника місце ерозійного зношування розміщене з правої сторони відводу трійника. Таке місцерозташування ерозійного зношування магістралі трійника зумовлене тим, що, перетікаючи у відвід трійника, незначна частина потоку, заокруглюючись, не потрапляє у відвід і частинки піску ударяються в стінку магістралі трійника з правої сторони відводу. У відводі трійника місце ерозійного зношування розміщене з правого боку відводу і зумовлене ударянням до стінки відводу частинок піску, які у потоці повітря перетекли у відвід трійника.

У трійнику, в якому потік рухається магістраллю трійника, і з магістралі увесь потік спрямовується у відвід трійника (рис. 4, в, г) місце інтенсивного ерозійного зношування розміщене і у магістралі, і у відводі трійника. Так, як і в попередньому випадку, у магістралі трійника місце ерозійного зношування розміщене з правої сторони відводу трійника. Таке місцерозташування ерозійного зношування магістралі трійника також зумовлено тим, що, перетікаючи у відвід трійника, незначна частина потоку, заокруглюючись, не потрапляє у відвід і части-

Література

нки піску ударяються в стінку магістралі трійника з правої сторони відводу. У відводі трійника місце ерозійного зношування розміщене з правої і лівої сторони від твірної відводу трійника, розміщеної з правого боку відводу і має витягнуту форму. Таке місцерозташування ерозійного зношування відводу трійника спричинене ударянням до стінки відводу частинок піску, які у повітряному потоці перетекли у відвід трійника.

У трійнику, в якому потік рухається відводом трійника, і з відводу увесь потік спрямовується у одну сторону магістралі трійника (рисунки 4, д, е) місце інтенсивного ерозійного зношування розміщене в магістралі трійника навпроти відводу і має грушоподібну форму. Кругла частина грушоподібного місця ерозійного зношування майже повністю співпадає з проекцією відводу трійника на внутрішню стінку його магістралі. Витягнута частина грушоподібного місця ерозійного зношування простягається в сторону руху потоку магістраллю трійника.

Для кращого розуміння процесів ерозійного зношування фасонних елементів трубопроводів доцільно ознайомитись з результатами дослідження динаміки руху багатофазних потоків фасонними елементами [9, 10] та дослідженнями динаміки руху газу фасонними елементами [10, 11] виконаними в програмному комплексі CFD моделювання ANSYS Fluent R17.0 Academic.

Висновки

Розроблений багатофункціональний експериментальний стенд-макет лінійної частини газопроводу дає можливість дослідити рух двофазних потоків фасонними елементами трубопроводів, виявити місця інтенсивного ерозійного зношування відводів, трійників трубопроводів.

Виявлено, що максимальне ерозійне зношування відводів відбувається з опуклого їх боку в кінці заокругленої частини відводу.

У трійниках місцезнаходження ерозійного зношування залежить від схеми руху потоку трійником. У трійниках, в яких потік рухається магістраллю трійника, і з магістралі частина або весь потік спрямовується у відвід трійника – місце інтенсивного ерозійного зношування розміщене і у магістралі (з правої сторони відводу) і у відводі трійника (з правого боку відводу). У трійниках, в яких потік рухається відводом трійника і з нього спрямовується у одну з сторін магістралі трійника місце ерозійного зношування трійника має грушоподібну форму і розміщене навпроти відводу трійника. Витягнута частина грушоподібного місця ерозійного зношування простягається в сторону руху потоку магістраллю трійника.

Експериментально виявлені місця ерозійного зношування фасонних елементів трубопроводів співпали з місцями їх ерозійного зношування, виявленими комп'ютерним моделюванням, що підтверджує достовірність моделювання.

1 Abdolkarimi V. CFD modeling of particulates erosive effect on a commercial scale pipeline bend / V. Abdolkarimi, R. Mohammadikhah // *ISRN Chemical Engineering*. – Volume 2013, Article ID 105912, 10 pages. (<http://dx.doi.org/10.1155/2013/105912>).

2 Kuan B. CFD simulation of dilute gas-solid two-phase flows with different solid size distributions in a curved 90° duct bend / B. Kuan // *The Australian and New Zealand Industrial and Applied Mathematics*. – Volume 46. – 2005. – P. 744-763.

3 Mohanaragam K. Numerical simulation of turbulent gas – particle flow in a 90° bend: eulerian – eulerian approach / K. Mohanaragam, Z. Tian, J. Tu // *Computers and Chemical Engineering*. – Volume 32, № 3. – 2008. – P. 561-571.

4 Mohanaragam K. Numerical computation of turbulent gas-particle flow in a 90 degree bend: comparison of two particle modeling approaches / K. Mohanaragam, Z. Tian, J. Tu // *The Australian and New Zealand Industrial and Applied Mathematics*. – Volume 48. – 2007. – P. – 741-758.

5 Ibrahim K. Gas-solid two-phase flow in 90° bend / K. Ibrahim, M. El-Kadi, M. Hamed, S. El-Beheri // *Alexandria Engineering Journal*. – 2006. – Volume 45, No 4. – P. 417-433.

6 Tian Z. Numerical modeling of turbulent gas-particle flow and its applications / Z. Tian // PhD Thesis: School of Aero-space: RMIT University, Melbourne. – 2006. – 149 p.

7 Azimian M. Investigation of hydroabrasion in slurry pipeline elbows and T-junctions / M. Azimian, H.-J. Bart // *Journal of Energy and Power Engineering*. – 2014. – No 8. – P. 65-78.

8 Mazumder Q. S-bend erosion in particulated multiphase flow with air and sand / Q. Mazumder // *The Journal of Computational Multiphase Flows*. – Volume 8 (3). – 2016. – P. 157-166. (<https://doi.org/10.1177/1757482X16668363>).

9 Дорошенко Я. В. Дослідження динаміки руху багатофазних потоків фасонними елементами обв'язки компресорної станції магістрального газопроводу / Я. В. Дорошенко, Т. І. Марко, Ю. І. Дорошенко // *Міжнародний науковий журнал*. – 2016. – № 7. – С. 68-77. (<https://doi.org/10.21267/IN.2016.7.2662>).

10 Дорошенко Я. В. Комп'ютерне моделювання ерозійного зношування відводів лінійної частини магістрального газопроводу / Я. В. Дорошенко, Т. І. Марко, Ю. І. Дорошенко // XVI Всеукраїнська науково-технічна конференція «Актуальні проблеми енергетики та екології», (Одеса, 5-8 жовтня 2016 р.). – Одеса: Одеська національна академія харчових технологій, 2016 – С. 85-88.

11 Дорошенко Я. В. Дослідження динаміки руху газу фасонними елементами обв'язки компресорної станції / Я. В. Дорошенко, Т. І. Марко, Ю. І. Дорошенко // *Науковий вісник ІФНТУНГ*. – 2016. – № 1 (40). – С. 57-71.

12 Squires K. Particle response and turbulence modification in isotropic turbulence / K. Squires, J. Eaton // Phys. Fluid. – 1990. – Volume 2, No 7. – P. 1191.

13 Hinze J. O. Turbulence / J. O. Hinze. – New York: McGraw-Hill, 1975. – 790 p.

14 Кочевский А. Н. Возможности моделирования течений жидкости и газа с помощью современных программных продуктов / А. Н. Кочевский // Вісн. Сум. держ. ун-ту. Сер. Техн. науки. – 2004. – № 13. – С. 5-20.

15 Finnie I. On the formation of surface ripples during erosion / I. Finnie, Y. Kabil // Wear. – 1965. – No 8. – P. 60-69.

*Стаття надійшла до редакційної колегії
09.02.17*

*Рекомендована до друку
професором Грудзом В.Я.
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)
канд. техн. наук Костівим В.В.
(УМГ «Прикарпаттрансгаз»,
м. Івано-Франківськ)*